第38卷 第3期
2021年5月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 3
May 2021

高立式尼龙网沙障防风阻沙特征及其合理配置

席 成[1,2]， 左合君[1,2]， 王海兵[1,2]， 闫 敏[1,2]， 贾光普[1,2]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院 内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018）

摘 要： 高立式沙障在线性工程风沙灾害防护中被广泛应用，布置模式直接影响工程防风阻沙效率和成本效益。在乌兰布和沙漠穿沙公路迎风侧，选择上疏下密式尼龙阻沙网分别设计4种高度单行、4种高度3种间距双行沙障来模拟风沙灾害防治观测场，使用阶梯式集沙仪与HOBO风速采集仪对不同风速下防风阻沙效率参数进行观测。结果表明：(1) 低风速(<12 m·s^{-1})背景下，高立式尼龙阻沙网沙障障后有效防护距离单行为3H(相同沙障高度的距离)以内，双行为12H。(2) 单行高立式尼龙阻沙网沙障的障后3H沙障截留率平均为85.14%，障后5H平均为91.23%；双行障后3H平均为93.53%。(3) 在中低风能地区线性工程防护中配置尼龙阻沙网时，不建议使用0.6 m及以下高度沙障；8 m·s^{-1}风速及以下可配置1 m高度单行尼龙阻沙网沙障；8~12 m·s^{-1}风速可配置间距8H、高度0.8~1.0 m双行尼龙阻沙网；在大风速区(>12 m·s^{-1})选择拓宽间距至10H、高度1.2 m尼龙网沙障多条带复式配置。此模式可优化治沙工程设计，完善线路工程沙害防治体系。

关键词： 高立式沙障；防风效益；阻沙截留率；配置优化

高立式沙障作为常见的风沙防治技术措施之一，减少了风蚀沙埋对线性工程造成的损失[1]。沙障布设方式直接影响风沙灾害防治效率和成本效益等问题，在对不同类型沙障配置探索中，前人进行了野外观测、风洞试验[2-3]与数据模拟[4]等工作并取得了相应进展，陆续确定了野外0.9 m高抗紫外线尼龙网栏和1.1 m高白尼龙网栅栏单排沙障的防护范围均为10H[5]，但在风洞模拟实验中，有关学者认为1.2 m高尼龙网栅栏其防护范围可达到30 m[6]。沙障高度与防护距离存在一定联系，既能有效减弱防护区的风速及输沙，又要达到良好防护效应，学者们相继设置了风沙流活动迎风侧布设3排间距20 m[7]、3排高度1.5 m间距15 m[8]的试验模式，认为双行沙障的合理间距为障高的5倍距离，且此时障间积沙量最大[9-10]，相应风洞试验间距6H高度2.5~3 m[11]以及数值模拟中1~2道1.5 m高间距20~30 m的设置模式都证明了高立式沙障的防护效果，并发现3道高立式沙障后的输沙可降低99%以上[12]。

上述给出的配置中，不同实际情况和试验者侧重下所得出效益的量化幅度存在差异，同一背景下可供选择的参数较少。沙漠环境条件差异性显著，理想状态的样点对比试验层次较少，一种或两种的梯度试验选取配置较为单调。风洞试验多为某一设定的特殊背景，选取的模拟材料、模型比例和几何相似等问题也使得模拟结果不能真实反映双行高立式沙障的阻风固沙特点，而数值模拟给定的边界条件和相关参数又较为简化。实践研究发现，风况的复杂性以及设障参数的多样性使双行沙障对单行沙障的复合变化规律存在一定联系，不同组合间距及不同高度配置下的沙障对比试验具有重要意义。

尼龙网近年来被广泛应用在防沙阻沙领域，相对于传统植物等沙障抗老化、抗风沙特性强，方便生产和运输施工，应用前景广阔[13-14]。本文选用尼龙阻沙网作为研究对象，通过控制对比野外试验，对不同行间距、不同高度、不同组合条件下的单行和双行高立式沙障的实际防风变化特征、沙障阻沙量进行观测，探究不同类型配置下对实际防风阻沙效益及有效防护距离的影响。本研究可明确其在

收稿日期： 2020-11-10； **修订日期：** 2020-12-31
基金项目： 内蒙古自治区科技重大专项"沙地生态系统近自然修复技术研究及产业化示范"(2019ZD007)资助
作者简介： 席成(1997-)，男，硕士研究生，主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: xicheng0825@126.com
通讯作者： 左合君. E-mail: zuohj@126.com

迎风侧、背风侧风速变化规律,以及高度和间距影响下的阻沙特征,并补充相应的野外实际数据,选取出满足实际效益且用材少、成本低的沙障搭配,为治沙工程的优化设计以及线路工程沙害防治体系结构提供基础数据支撑。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于巴彦淖尔市磴口-乌斯太穿沙公路北部,地理位置位于40°10′21″~40°10′23″N,106°48′17″~106°48′19″E。研究区内沙源丰富,风沙活动频繁,起沙风多为W、WNW、WSW风,多年平均风速为3.7 m·s^{-1},大风风速平均10.5 m·s^{-1},多年平均大风日数10~32 d,扬沙日数75~79 d,沙尘暴日数19~22 d。格状沙丘及沙丘链分布广泛,流动、半固定、固定沙丘交错分布。该区属于典型的中温带大陆性季风气候,气候干燥,多年平均降雨量142.7 mm,平均蒸发量2380.6 mm,平均气温8 ℃;土壤为典型的风沙土,植被主要有白刺(*Nitraria tangutorum*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)等。试验区经前期机械推平处理,地形平坦,范围开阔,是观测防沙措施防护效益的理想观测场。

1.2 研究方法

1.2.1 材料选择与试验布设

(1) 材料选择 已有研究表明,疏透度0.3~0.6时能产生最大的有效防护距离[15-17],而对于尼龙网,相关学者针对均匀型、上密下疏型、上疏下密型进行对比发现,上疏(55%)下密(45%)式结构更佳[6,15,18],故本试验均选择上疏下密式尼龙网。

(2) 试验布设 2019年3—4月在乌兰布和沙漠磴乌穿沙公路北部布设试验。选取4种不同高度(0.6 m、0.8 m、1.0 m、1.2 m)的单行(A)、双行高立式尼龙网(B、C、D)沙障各50 m,其中,双行沙障设置时第一排和第二排间距分别为4 m、8 m、12 m。布设方式为同一水平线平铺,各类沙障相互断开避免干扰,且均与主风向垂直;对照旷野试验布设在迎风侧不受影响的平坦裸沙地上,试验布设示意图见图1。

1.2.2 风速测定 本次风速测量采用美国Onset公司生产的风速采集仪(HOBO),采集时间间隔设置为2 s。当风向与高立式沙障垂直时,开始测量并记录时间,各点位观测时间不少于30 min。垂直梯度的风杯高度分别为0.2 m、0.5 m、1.0 m、1.5 m。以1 m高度为例,迎风侧为障前,背风侧为障后,单行观测点位分别设置在沙障障前-10H、-8H、-5H、-2H、-H;障后H、2H、5H、8H、10H;双行则每隔2H设置一点位,其他高度根据实际H按一定倍数调整,具体点位设置见图2(其中H代表相同沙障高度的距离,下同)。

1.2.3 积沙测定 集沙仪采用阶梯式集沙仪,集沙仪设置10个高度层,分别为0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm、15~20 cm、20~25 cm、25~30 cm、30~35 cm、35~40 cm、40~45 cm、45~50 cm。单行集沙仪测点为障前、障后3H、障后5H,双行为障前、障后3H、障中,布设示意见图2。当达到起沙风速时开始观测风沙流,并且记录时间,观测结束时及时进行封盖且记录时间。采集后的沙粒样品用精度0.001 g的电子天平称重并记录。

1.2.4 计算方法

(1) 有效防护距离 大多学者依据野外观测和风洞模拟结果,认为林带下风向恢复到相同高度处旷野风速的20%~50%位置与林带之间距离为有效防护距离[9,19-21]。实际应用中,沙障措施的合理有效防护距离既可以保证防风阻沙效果,又可以有效降低经济成本。因此,本文借鉴前人研究结果,选取采用较多的减弱旷野风速的50%确定有效防护距离,并在风速图示中用虚线标注,计算公式如下:

$$b_{kij} = \frac{V_{kj} - V_{kij}}{V_{kj}} \times 100\% \tag{1}$$

式中:V_{kij}为坐标(i, j)点在k风速环境的风速值(m·s^{-1});V_{kj}为旷野风速的位置(m·s^{-1});b_{kij}为坐标在(i, j)点在k下的加速率,即风速削弱百分比,b_{kij}越大其防风效果越好。

(2) 沙障截留率 将地面沙物质的侵蚀过程假设为纯风切变应力与含沙风冲击磨损的叠加效应,引用截留率的概念[22],并将其作为主要参数之一,可定量评价沙障对沙物质颗粒截留的影响。即侵蚀沙粒通过沙障时,部分沙粒被截留,被截留的沙粒占沙粒侵蚀总量的百分比称为沙障截留率。计算公式如下:

$$n = \frac{W - Q}{W} \times 100\% \tag{2}$$

式中:n为沙障截留率;W为同一风速下同高度层旷野输沙通量(g·cm^{-2}·min^{-1});Q为沙障影响后剩余输沙通量(g·cm^{-2}·min^{-1})。

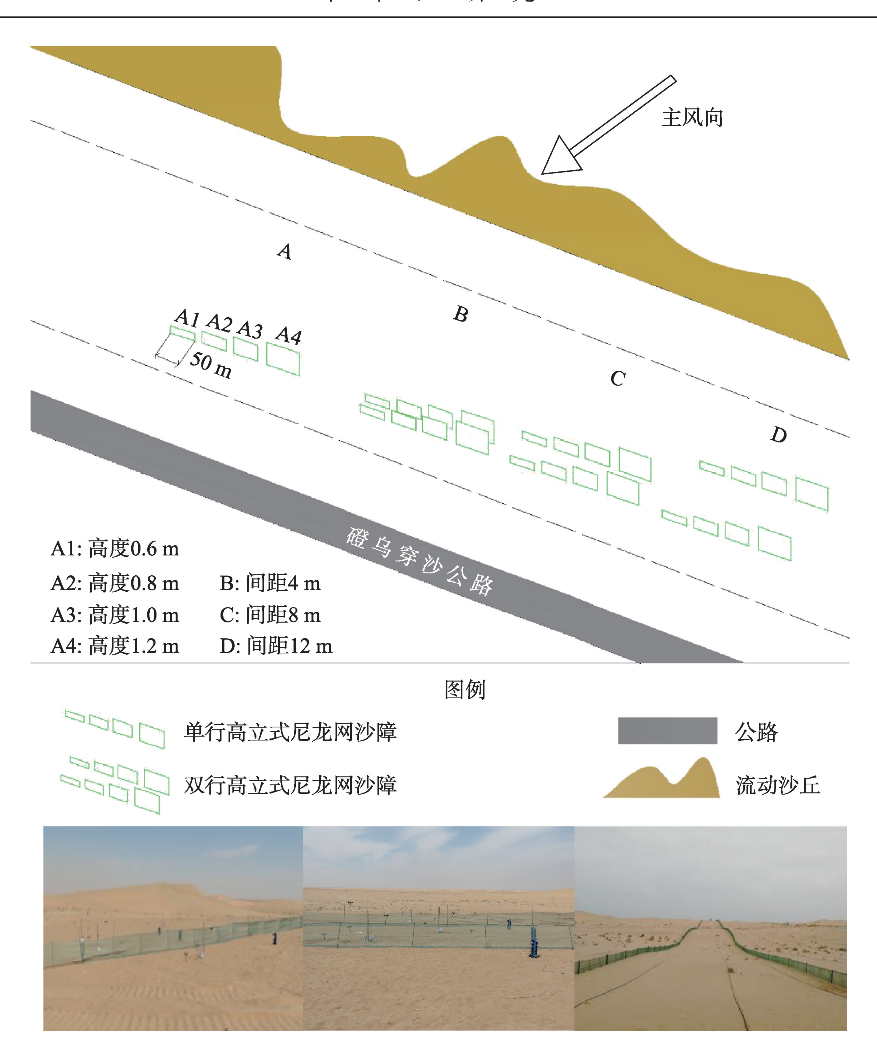


图1 观测示意图

Fig. 1 Observation schematic diagram

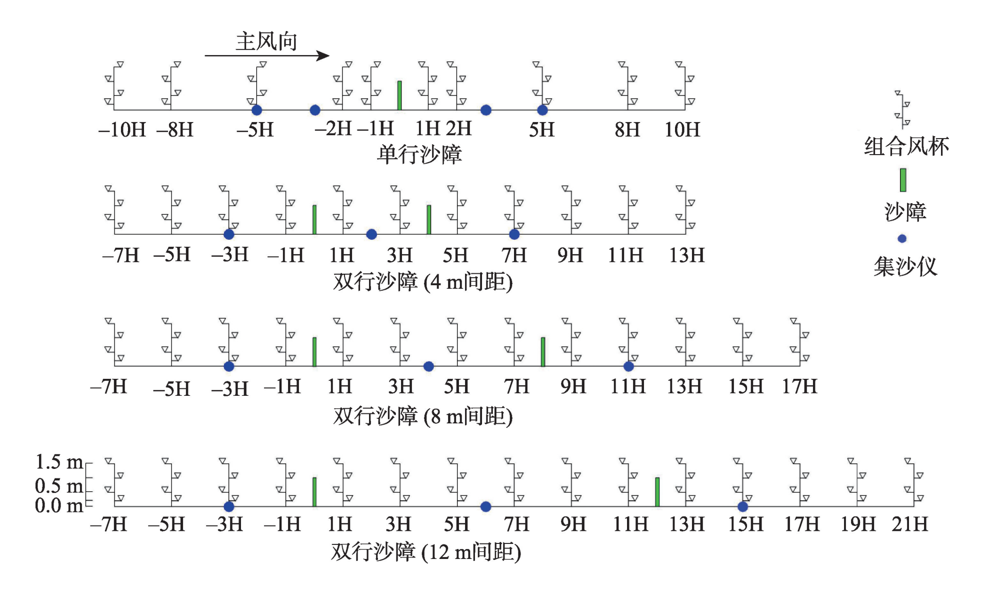


图2 观测点位布设示意

Fig. 2 Schematic layout of observation points

2 结果与分析

2.1 尼龙网沙障气流速度变化特征

2.1.1 沙障高度对防风效应的影响　从图3可以看出,沙障高度相同时,以1 m沙障高度为例,4种指示风速下,风速越大,沙障对来风风速的降低百分比越大,障前风速急速削弱的拐点基本符合障前-2H距离的规律。以0.2 m高度处风速降低百分比为指示,障后有效防护距离为1.9H、2.0H、2.6H、3.2H,0.5 m高度处则为0H、1.6H、2.0H、2.6H,受到一定幅度的减弱,位置越高所受沙障影响的效果越低。在同风速下,4种高度风速急速削弱的拐点障前仍为2H处,而有效防护距离随沙障高度增加而增加,以0.2 m高度为指示时,障后有效防护距离为2.2H、2.5H、3.0H、3.6H,0.5 m高度处则为1.5H、1.7H、2.6H、2.3H。沙障高度越低,障后的有效防护距离越短,相同条件下,高度是制约防风效应的关键因素。指示风速的大小对风速减弱规律没有明显影响,只对有效防护距离有影响。

2.1.2 沙障行间距对防风效应的影响　如图4所示,风速恒定时4种高度沙障障前风速急速削弱的拐点维持在障前3H(-1.8 m、-2.4 m、-3.0 m、-3.6 m)。12 m间距配置下,0.6 m高度沙障低于50%风速降低比在沙障之间出现的距离为12.5H,0.8 m高度时为8.7H,1.0 m高度为3.7H,1.2 m高度为1.2H。0.6 m高度双行沙障防护效益最低,防护效益随沙障高度增加而增加,1.2 m高度时最好,但在此间距配置时,4种高度沙障中防护效应均出现了中断,防护效果未连续,并接近恢复旷野水平,说明沙障间距较大。8 m间距配置时,0.6 m、0.8 m高度沙障低于50%风速降低比在沙障之间出现的距离为8.8H、3.8H,1.0 m、1.2 m高度沙障有连续较好的防风效应,前排沙障后有效防护距离分别能达到12.9H、11.9H,其中1 m高度沙障在有效防护距离内,风速降低百分比持续在60%及以上,防护效果较为理想。4 m间距0.6 m高度配置良好防护距离仅为0.8H,而0.8 m、1.0 m、1.2 m高度沙障则有连续较好的防风效应,有效防护距离分别能达到8H、7H、6.8H,此时出现了沙障高度增加,防护距离减短的现象。其原因是由于间距较窄造成后3种沙障在此间距配置时防护效应出现重叠,且沙障高度越高,重叠越明显,此间距相对较窄。

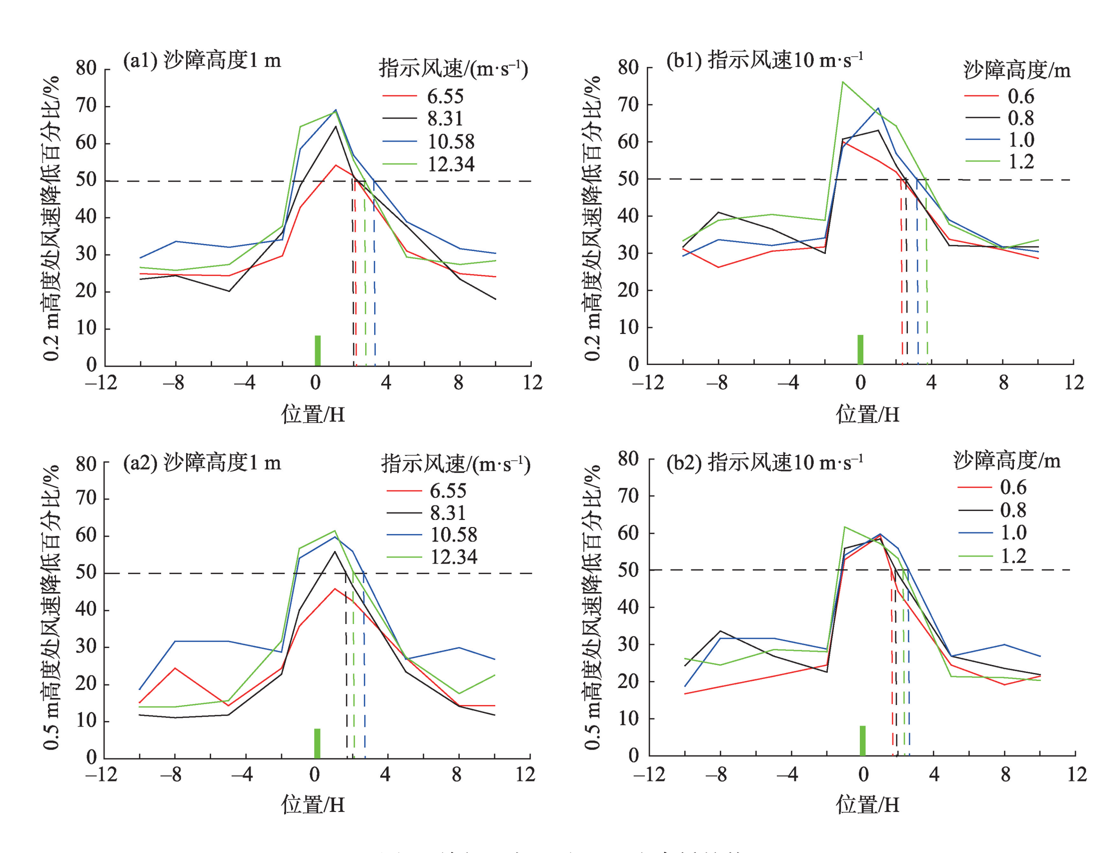


图3　单行尼龙阻沙网风速降低趋势

Fig. 3　Wind speed reduction trend of single-row nylon sand screen

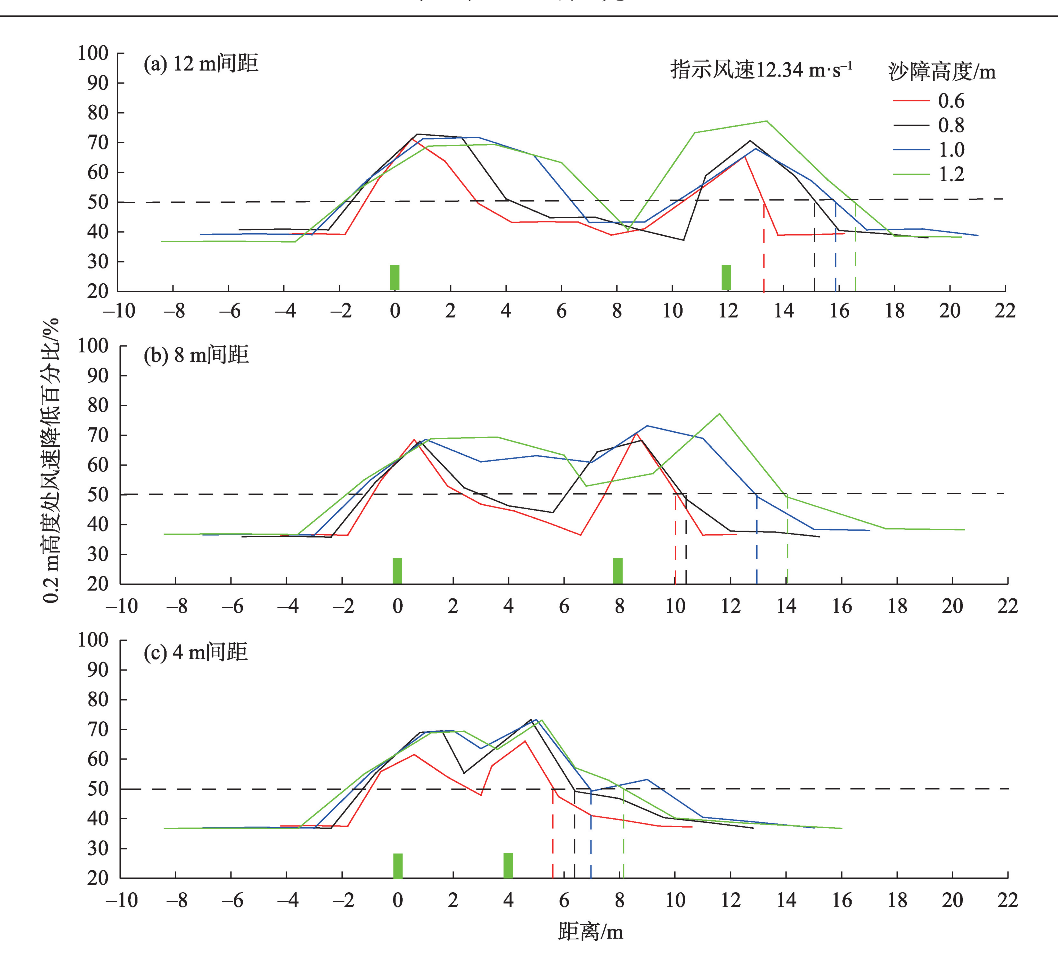


图4 双行尼龙阻沙网风速降低趋势

Fig. 4 Wind speed reduction trend of double-row nylon sand screen

通过上述分析可得，双行沙障8H间距布设为最佳，结合单行尼龙阻沙网的防护效果，以0.2 m高度12 m·s^{-1}风速为指示时，高度1 m间距8H双行尼龙阻沙网的有效防护距离为12.9H，此时单行沙障为3.2H，约为4.03倍；高度1.2 m的双行沙障为11.9H，单行为3.6H，约为3.31倍。

2.2 尼龙阻沙网阻沙特征

2.2.1 沙障高度对阻沙效益的影响 指示风速的变化对输沙量的影响显著，主要体现在风速增加时所携带沙粒增多，旷野及障前输沙量激增，对障后削弱程度的改变影响较小。如图5所示，指示风速增大，旷野的积沙增多，同时，在同种高度条件下，沙障截留率亦呈缓慢增大趋势，随着高度的增加，截留率已趋向100%。以高度0.8 m为例，指示风速为6.91、9.53、10.87 m·s^{-1}时对应的旷野积沙分别为0.34、1.28、2.57 g·cm^{-2}·min^{-1}；障后5H处截留率分别为74.55%、88.29%、89.47%。障后的截留率增大是由于沙障高度的改变，从0.6 m高度到1.2 m高度沙障截留率的提升效果十分明显，高度增大，拦截面积增大，拦截效率增高，这同时也印证了风速分析中高度是关键因素的结果。

风沙流主要集中在近地面开始搬运，高度增加，输沙通量占比降低，其他位置处也相同，以1 m高度沙障为例，在指示风速10.87 m·s^{-1}下0~30 cm 6个高度层积沙占比分别为35.85%、26.52%、15.31%、9.32%、5.49%、3.38%。障后3H、5H处6个高度层内的输沙通量对比旷野同层均有大幅度降低，降幅在82.87%~100%，不同高度层的截留输沙规律与旷野相似，但由于风速较小时起沙风本身携带的沙量较小，在沙障的阻碍下几乎完全拦截，随着风速的增加，各点的输沙通量增加。

2.2.2 沙障行间距对阻沙效益的影响 沙粒在第一行沙障障前大量卸载，风速不改变输沙整体变化规律而影响输沙量的变化，风速增大，旷野的输沙通量增大。如图6所示，以10.63 m·s^{-1}指示风速下的输沙特征为依据，0.6 m高度沙障时，8 m、12 m间距下沙障中间的输沙通量分别为2.19、2.63 g·cm^{-2}·min^{-1}，相对旷野的输沙（3.78、3.33 g·cm^{-2}·min^{-1}），障

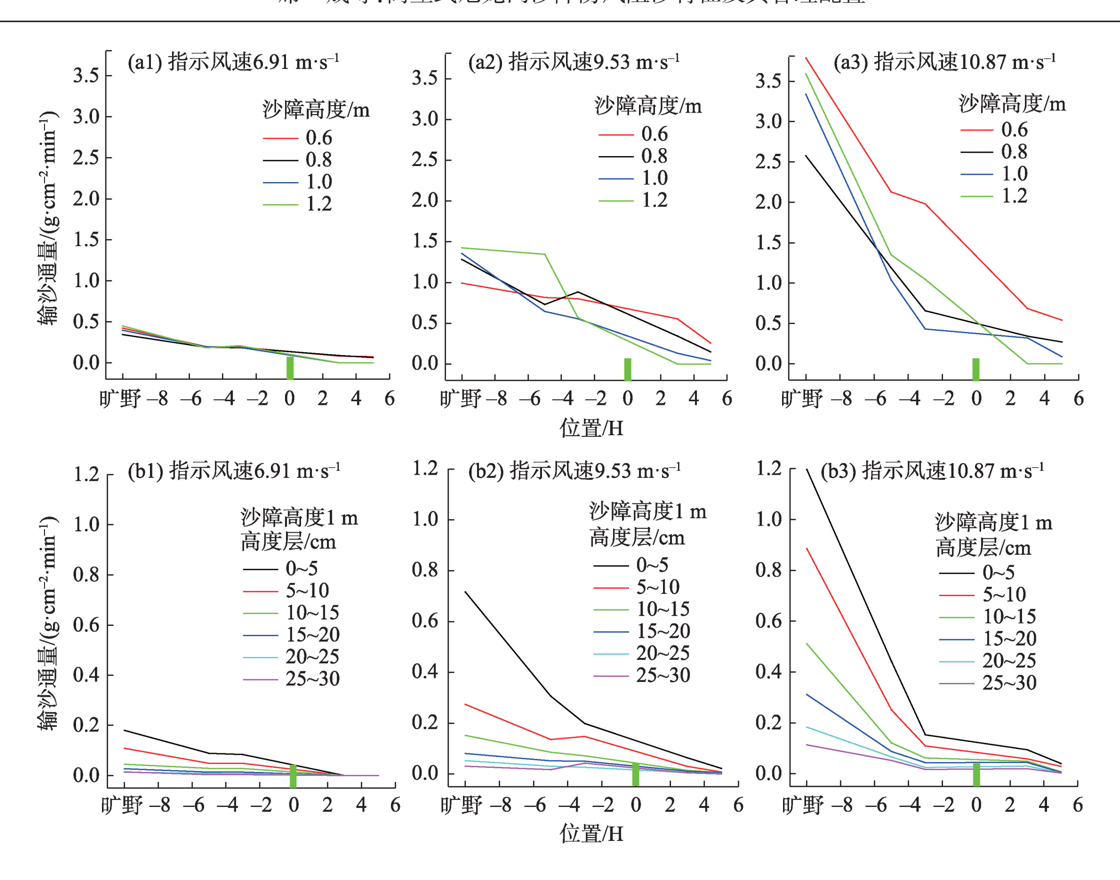


图5　单行尼龙阻沙网输沙通量变化

Fig. 5　Variation of sediment transport capacity of single-row nylon sand screen

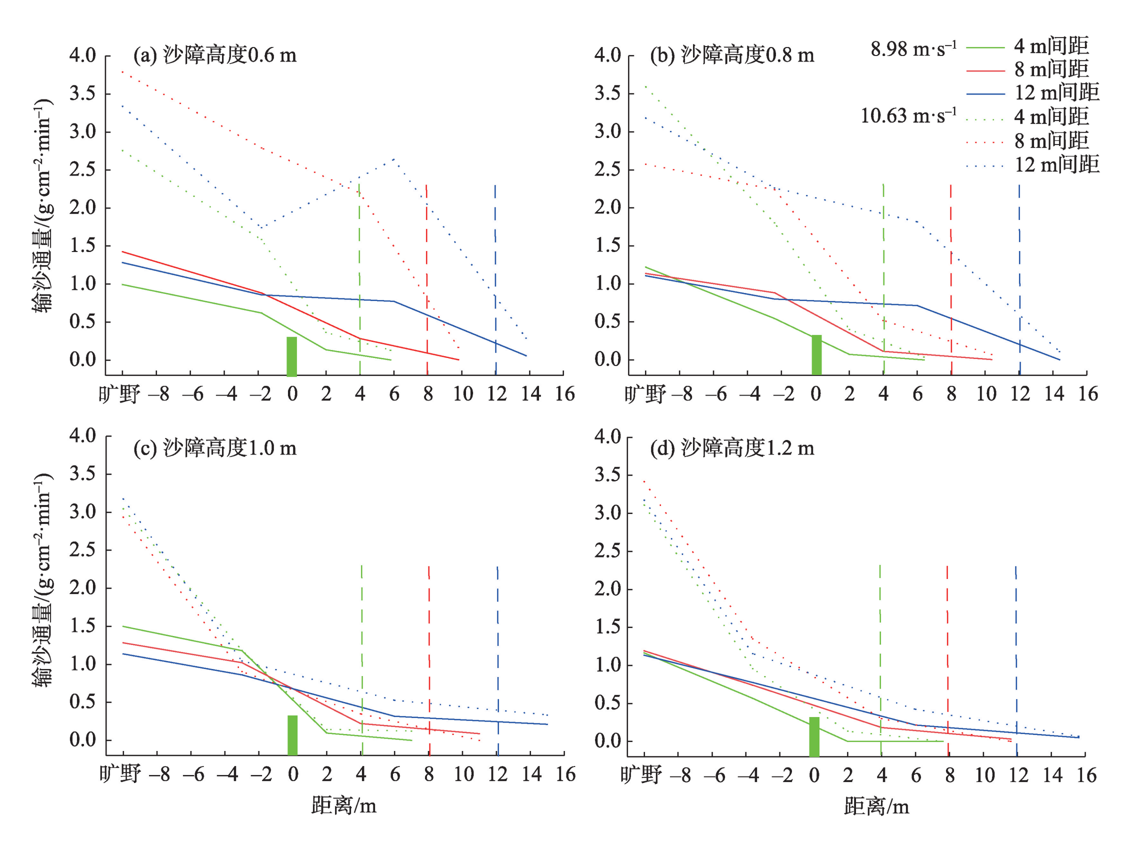


图6　双行尼龙阻沙网输沙通量变化

Fig. 6　Variation of sediment transport capacity of double-row nylon sand screen

中沙障截留率分别只有41.94%、20.96%，效益较低；障后3H输沙通量的剧烈降低（0.16、0.28 $g\cdot cm^{-2}\cdot min^{-1}$）可以认为是第二行沙障的单独作用，不能形成连续有效防护效应。4 m间距时障中、障后的沙障截留率分别为86.81%、95.21%，效益较好。

同理，0.8 m高度沙障时，12 m间距下沙障中间的输沙通量分别为1.81 $g\cdot cm^{-2}\cdot min^{-1}$，相对旷野的输沙（3.18 $g\cdot cm^{-2}\cdot min^{-1}$），障中沙障截留率分别只有42.89%，效益较低。4 m间距时障中、障后3H的沙障截留率分别为88.78%、98.90%；8 m间距时为79.77%、97.18%，效益较好。1.0 m高度沙障时3种间距配置下，障中输沙通量分别为0.14、0.34、0.52 $g\cdot cm^{-2}\cdot min^{-1}$，沙障截留率分别为95.24%、88.13%、83.35%；障后3H输沙通量分别为0.12、0、0.33 $g\cdot cm^{-2}\cdot min^{-1}$，沙障截留率分别为95.97%、100.00%、89.47%。1.2 m高度沙障时障中输沙通量分别为0.13、0.29、0.42 $g\cdot cm^{-2}\cdot min^{-1}$，沙障截留率分别为95.62%、91.26%、86.67%。障后3H输沙通量已经接近于0，沙障截留率效果显著。

3 讨 论

3.1 不同沙障配置作用下气流速度特征

单行尼龙阻沙网没有间距的设定，效益分析中主要注重高度和风速的影响。指示风速恒定时，沙障影响的弱风区随着沙障高度增加而变大，沙障的防护效益越好，这与已有研究结论相符合，高度对强减速区和过渡区域影响较大，例如曹波等[23]对比3种高度沙障后发现1 m高度的沙障效益较优，但没有对具体复式沙障的间距设定给出明确数值；胡春元等[24]在库布齐穿沙公路防护体系配置内提出，由5~7行障高2 m左右间距24~40 m的高立式沙柳沙障可以发挥最佳性能，但在2 m及以上障高时夏季则容易倾倒。本文拓展了高度配置梯度，针对气流削弱及实际效果，综合前人所得结论，建议野外沙障配置1~1.2 m高度为宜。

沙障增加至双行时，这种趋势仍未改变，指示风速与间距恒定时，高度越高弱风区的范围越大。单行沙障拐点在障前2H，双行为障前3H，指示风速变化，这种趋势也几乎没有受到影响。双行沙障来风会经历两次不同程度的削弱，这种趋势随着沙障高度以及双行沙障间距的变化逐渐减弱。同样的间距或者高度条件下，一个因素的改变都会对防风效益有影响，高度增加或间距减小，双行沙障中间的防护效益发生重叠，风速降低的整体趋势向单峰型靠拢，这同张克存等[25]研究结果相一致，本文附加了高度与间距的动态变化，高度减小或间距增大，沙障中间则会出现没有防护效应的区域。

不论单行还是双行的高立式尼龙阻沙网，高度都是影响沙障防护效益的关键因素。双行高立式沙障较单行对风速的阻碍和降低表现出明显的累加复合变化作用，合理的沙障间距不但有利于防止风蚀沙埋，而且有利于扩大防护范围提升效益。

3.2 不同沙障配置作用下输沙特征

输沙通量的多少反映风场变化及风速流场的强弱，弱风环境下（<12 $m\cdot s^{-1}$）总体输沙量均随旷野风速的增加而增大，随沙障高度的增高而减小。旷野风速增加，对照位置输沙量逐渐增多，不同高度沙障前的输沙量也随之增多，本文拓展到0~50 cm高度与马世威[26]对0~10 cm高度层内上中下三层输沙研究规律相一致。从风沙流垂直分布来看，单位时间单位面积上的输沙量表现为：旷野>迎风侧障前>沙障中间（单排忽略）>背风侧障后。近地表输沙量的变化随高度的增加而减少，高度到达一定程度后下降的幅度逐渐平缓，高度继续增加后积沙量几乎为零。输沙集中在0~10 cm高度内，10~30 cm高度层随高度增加输沙量降低，30 cm以上高度输沙量接近为0。

双行沙障中间积沙量随间距的变化最为明显。4 m间距时最小，8 m间距时逐渐增大，12 m间距时最大，沙障对风沙流的拦截能力及其空间分布受组合间距大小影响较大，组合间距越小，阻沙能力越大，反之则越小，这与康向光等[27]人的研究结果相一致，组合间距越小，积沙分布就越相对集中。在所测有效高度内，间距越小，防护效益越好，这同闫敏等[28]对不同间距的防护林研究结果一致，其中林带防风效果为4 m>6 m>8 m，本文双行沙障的防风阻沙整体效果为4 m>8 m>12 m。

3.3 尼龙阻沙网的合理沙障配置

只考虑输沙或风速改变都不能选出最适沙障配置，应综合两者选取符合实际效益且用材少、成本低的搭配。本文对比4种高度沙障发现，0.6 m高度单、双行高立式沙障防护效益均最低，故不建议使用0.6 m高度高立式尼龙网沙障。截留率越大说明沙障对风速削弱作用越显著，单行障后输沙量最

少的是1.2 m高度沙障,但1.0 m高度沙障的障后输沙量减小幅度最大,同时在实际操作中(表1),沙障高度每提高0.2 m,成本平均提高0.3×10^4元。结合防风效果及铺设成本来看,单行高立式尼龙阻沙网沙障中选择1.0 m高度较为合理。

表1　尼龙阻沙网沙障成本明细

Tab. 1　Cost details of nylon sand barrie

沙障高度/m	沙障材料费/(元·m^{-1})	沙障固定桩柱费/(元·根$^{-1}$)	人工费/(元·m^{-1})	铺设长度/km	成本投入/10^4元
0.60	6.00	5.00	6.00	1	1.45
0.80	8.00	7.15	6.00	1	1.76
1.00	10.00	8.50	6.00	1	2.03
1.20	12.00	10.00	6.00	1	2.30

在具有相同防护效果时,双行沙障取最大间距为最佳。组合间距增加,拦截和固沙的能力越弱,组合间距越小则沙障中间及障后的截留越大,但间距过小使防护效益出现重叠,间接增加了成本,实际中并不可取。实际铺设时,暂定沙障每2 m进行一次固定,以1 m高度双行沙障防护距离达到13H左右时为例,理论4 m间距时需配置两带,8 m间距时则只需配置一带,成本节省约3.045×10^4元。本试验得出最佳间距的布设模式为8H,袁鑫鑫等[9]在风洞模拟认为铺设双行阻沙网的最佳间距为5H,相比本实验结果偏小,其原因可能是风洞模拟过程不能替代自然风,且缺少了不同高度配置的试验对比。韩致文等[29]在塔里木沙漠公路防沙体系中发现高立式阻沙沙障之间宽度为15~20H偏宽,体系内部出现沙害;刘世海等[30]观测了青藏铁路格拉段防护体系中最外源3排高立式沙障,认为高立式沙障的多排应用对于降低侵蚀量的作用优于单排沙障,综合应用效果更佳,但多排高立式沙障不只是简单增加沙障排数。防护效益既包括防风阻沙程度又涉及铺设成本,本文通过对比实验及梯度控制,计算了同一背景下多参数、多选择对比模式配置下的高立式沙障的防护效益,因此,研究结果更能真实地反映自然状态时高立式沙障的防护效果。其中,1.0 m、1.2 m高度沙障在第一行沙障之后影响的变化规律相似,但并不是在间距的选取时相同。综合试验实际防风阻沙结果,本次间距12 m双行高立式沙障试验中,1.0 m、1.2 m高度沙障中间的稍高风速削弱比可以认定为合理,因此对于最适防护距离的确定,结合部分学者在风洞试验和人为设置高立式沙障的试验结果,在更高高度的沙障选择中,沙障间距可以拓展到10H。

综上所述,当沙障间距过窄或过高时,其防风效果虽好,但浪费了一部分原有的防护效益,增加了实际操作的成本。但是,如果间距大范围设置,则沙障中间逐渐向旷野形势恢复,沙物质的蚀积不能得到很好地控制,对实际所要防护的区域不能正常完成。因此,建立合理间距和高度搭配是至关重要的。在控制成本的前提下,于地形广阔、背景相似的中低风能地区配置1 m高度单行高立式尼龙阻沙网沙障、0.8~1.2 m高度8~10H间距双行高立式尼龙阻沙网沙障的研究结果对防风固沙与线性工程保护具有重要意义。

4　结 论

(1) 合理配置下,单行高立式尼龙阻沙网沙障迎风侧风速降低的拐点为-2H,双行为-3H,障后背风侧回归旷野风速的拐点随高度的抬升距离愈远,单行为3H以内,双行为12H,且不受指示风速的高低而波动。

(2) 近地表输沙量的变化随高度的增加而减少且主要集中在20 cm以内。单行沙障影响下,0~10 cm、0~20 cm输沙占比平均分别为69.44%、89.47%。单行高立式尼龙阻沙网沙障的障后3H沙障截留率平均为85.14%,障后5H平均为91.23%;双行高立式尼龙阻沙网的沙障截留率障后3H平均为93.53%。

(3) 在中低风能区域一般线性防护工程时,以节约成本、实际、易操作为前提,不建议使用0.6 m及以下高度沙障。8 m·s^{-1}风速以下可配置1 m高度单行尼龙阻沙网沙障;8~12 m·s^{-1}风速可配置间距8H、高度0.8~1.0 m双行尼龙阻沙网;在风速更大时,可选择1.2 m高度沙障多条带复式配置,间距拓宽至10H。

参考文献(References):

[1] Cheng J J, Xue C X. The sand-damage-prevention engineering system for the railway in the desert region of the Qinghai-Tibet plateau[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 125: 30-37.

[2] Jia W R, Zhang C L, Zou X Y, et al. Effects of ridge height and spacing on the near-surface airflow field and on wind erosion of a sandy soil: Results of a wind tunnel study[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 186: 94-104.

[3] Horvat M, Bruno L, Khris S, et al. Aerodynamic shape optimiza-

tion of barriers for windblown sand mitigation using CFD analysis [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 197: 104058. https: //doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104058.

[4] 张凯, 王起才, 杨子江, 等. 新建格库铁路HDPE板高立式沙障防风效益数值模拟研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 169−175. [Zhang Kai, Wang Qicai, Yang Zijiang, et al. Research on numerical simulation on wind protection benefits of HDPE panels with high vertical sand barrier in the Newly-built Golmud-korla railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 169−175.]

[5] 王训明, 陈广庭, 韩致文, 等. 塔里木沙漠公路沿线机械防沙体系效益分析[J]. 中国沙漠, 1999, 19(2): 25−32. [Wang Xunming, Chen Guangting, Han Zhiwen, et al. The benefit of the prevention system along the desert highway in Tarim Basin[J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(2): 25−32.]

[6] 屈建军, 刘贤万, 雷加强, 等. 尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟实验[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 62−66. [Qu Jianjun, Liu Xianwan, Lei Jiaqiang, et al. Simulation experiments on sand-arresting effect of nylon net fence in wind tunnel[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(3): 62−66.]

[7] 薛智德, 刘世海, 许兆义, 等. 青藏铁路措那湖沿岸防风固沙工程效益[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(6): 61−65. [Xue Zhide, Liu Shihai, Xu Zhaoyi, et al. Efficiency of wind erosion control measures along Cuona Labe on Qinghai-Tibet railway, western China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(6): 61−65.]

[8] 张克存, 屈建军, 牛清河, 等. 青藏铁路沿线阻沙栅栏防护机理及其效应分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 16−20. [Zhang Kecun, Qu Jianjun, Niu Qinghe, et al. Protective mechanism and efficiency of sand-blocking fences along Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(1): 16−20.]

[9] 袁鑫鑫, 王海峰, 雷加强, 等. 不同间距双排尼龙阻沙网防风效应的风洞模拟[J]. 中国沙漠, 2016, 36(5): 1238−1246. [Yuan Xinxin, Wang Haifeng, Lei Jiaqiang, et al. Wind tunnel simulation of windbreak effect of double-row nylon net fence with different interval[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(5): 1238−1246.]

[10] 康向光, 李生宇, 王海峰, 等. 高立式沙障不同叠加模式的阻沙量对比分析[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 550−555. [Kang Xiangguang, Li Shengyu, Wang Haifeng, et al. Deposited-sand volume of high vertical sand barrier under different stacking modes[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 550−555.]

[11] Wang T, Qu J J, Ling Y Q, et al. Shelter effect efficacy of sand fences: A comparison of systems in a wind tunnel[J]. Aeolian Research, 2017, 30: 32−40.

[12] 王洪峰. 临策铁路DK360+200防风固沙措施防护效果研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017. [Wang Hongfeng. Study on the Effect of Windbreak and Sand Fixation Measures at DK360+200 of Lin-Ce Railway[D]. Beijing: Beijing JiaoTong University, 2017.]

[13] 马学喜, 李生宇, 王海峰, 等. 固沙网沙障积沙凹曲面特征及其固沙效益分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 898−904. [Ma Xuexi, Li Shengyu, Wang Haifeng, et al. Concave surface features in Sand-fixing net barriers and evaluation of Sand-fixing benefits [J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 898−904.]

[14] Qu J J, Han Q J, Dong G R, et al. A study of the characteristics of aeolian sand activity and the effects of a comprehensive protective system in a coastal dune area in southern China[J]. Coastal Engineering, 2013, 77: 28−39.

[15] 袁鑫鑫, 王海峰, 雷加强, 等. 不同结构尼龙网防风效应的风洞模拟[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 185−190. [Yuan Xinxin, Wang Haifeng, Lei Jiaqiang, et al. Wind tunnel simulation of wind protection effects of nylon nets with different structures[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 185−190.]

[16] 罗万银, 董治宝, 钱广强, 等. 直立阻沙栅栏流场特征的风洞模拟实验[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 200−205. [Luo Wanyin, Dong Zhibao, Qian Guangqiang, et al. Wind tunnel simulation on the flow characteristics around upright fences[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(2): 200−205.]

[17] 张克存, 俎瑞平, 方海燕. 不同孔隙度尼龙网对风沙流减弱作用的风洞模拟[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 4−6. [Zhang Kecun, Zu Ruiping, Fang Haiyan. Simulation on abated effect of nylon net with different porosities on wind-blown sand in wind tunnel[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(4): 4−6.]

[18] Huang L M, Chan H C, Lee J T. A numerical study on flow around nonuniform porous fences[J]. Journal of Applied Mathematics, 2012, 1: 203−222.

[19] 唐玉龙, 安志山, 张克存, 等. 不同结构单排林带防风效应的风洞模拟[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 647−654. [Tang Yulong, An Zhishan, Zhang Kecun, et al. Wind tunnel simulation of windbreak effect of single-row shelter belts of different structure[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 647−654.]

[20] 卫林, 江爱良, 张翼. 论林带的有效防护距离[J]. 科学通报, 1985, 1(19): 1567−1570. [Wei Lin, Jiang Ailiang, Zhang Yi. On the effective protection distance of forest belt[J]. Chinese Science Bulletin, 1985, 1(19): 1567−1570.]

[21] Zhao W Z, Hu G L, Zhang Z H, et al. Shielding effect of oasis-protection systems composed of various forms of wind break on sand fixation in an arid region: A case study in the Hexi Corridor, Northwest China[J]. Ecological Engineering, 2008, 33(2): 119−125.

[22] Liu H Y, Hou Z F, Chen Z, et al. Effects of standing stubble on the interception of soil erosion particles[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(3): 1−9.

[23] 曹波, 孙保平, 高永, 等. 高立式沙柳沙障防风效益研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 40−45. [Cao Bo, Sun Baoping, Gao Yong, et al. Effect of high-banded *Salix psammophila* sand-barriers on reduction of wind speed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(2): 40−45.]

[24] 胡春元, 崔琳, 罗俊宝, 等. 库布齐沙漠公路沙害综合防护技术[J]. 内蒙古公路与运输, 2003, 1(1): 30−33. [Hu Chunyuan, Cui Lin, Luo Junbao, et al. Comprehensive protection technique for controlling the sand hazad for highway in Kubuqi Desert[J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2003, 1(1): 30−33.]

[25] 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 等. 不同结构的尼龙网和塑料网防沙

效应研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 483-487. [Zhang Kecun, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Simulation on abated effect of nylon and plastic nets with different structure on wind-blown sand in wind tunnel[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(4): 483-487.]

[26] 马世威. 风沙流结构的研究[J]. 中国沙漠, 1988, 8(3): 11-25. [Ma Shiwei. Study on structure of wind-sand flow[J]. Journal of Desert Research, 1988, 8(3): 11-25.]

[27] 康向光, 李生宇, 王海峰, 等. 不同组合间距的尼龙阻沙网积沙形态特征对比[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 283-291. [Kang Xiangguang, Li Shengyu, Wang Haifeng, et al. Morphological features of sand deposition caught by nylon net windbreak combinations with different intervals[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(2): 283-291.]

[28] 闫敏, 左合君, 杨阳, 等. 不同带间距柠条锦鸡儿防护林防风效应与带间植被组成[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 139-145. [Yan Min, Zuo Hejun, Yang Yang, et al. Different distance *Caragana korshinskii* protection forest for wind reducing effect and Inter-Type vegetation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 139-145.]

[29] 韩致文, 陈广庭, 胡英娣, 等. 塔里木沙漠公路防沙体系建设几个问题的探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(2): 35-40. [Han Zhiwen, Chen Guangting, Hu Yingdi, et al. Discussion on problems about construction of sand-controlling systems along desert highway in Tarim Basin, Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(2): 35-40.]

[30] 刘世海, 冯玲正, 许兆义. 青藏铁路格拉段高立式沙障防风固沙效果研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 133-136. [Liu Shihai, Feng Lingzheng, Xu Zhaoyi. Study on effect of wind erosion controlling in the Geerm-Lahsa section of the Qinghai-Tibet railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 133-136.]

Wind-proof and sand-blocking characteristics of high vertical nylon mesh sand barrier and its rational allocation

XI Cheng[1,2], ZUO Hejun[1,2], WANG Haibing[1,2], YAN Min[1,2], JIA Guangpu[1,2]

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Aeolian Sand Physics and Sand Control Engineering in Inner Mongolia, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract: High vertical sand barriers are widely used to protect against wind and sand disasters in linear engineering. The layout mode directly affects the efficiency and cost-effectiveness of wind and sand prevention in engineering. On the windward side of Ulan Buh Desert Sand Crossing Highway from Dengkou to Ustai, Inner Mongolia, we have designed two types of sand barriers, namely, single sand barrier with four heights and double sand barrier with four heights and three intervals, which are used to simulate the observation field of wind-sand disaster prevention and control. The ladder sand and HOBO wind speed collectors were used to observe the wind-proof and sand-blocking efficiency parameters under dust storms with different wind speeds. Results showed that under the background of low wind speed (<12 $m \cdot s^{-1}$), the effective protection distance behind the high vertical nylon sand barrier net is within 3H for single behavior and 12H for double behavior (Where "H" represents the distance of the same height of sand barrier). The average interception rate of single-row high vertical nylon sand barrier is 85.14% at 3H after barrier and 91.23% at 5H after barrier. The average sand barrier rejection rate of the double-row high vertical nylon sand barrier net is 93.53% at 3H after the barrier. It is not recommended to use sand barriers with a height of 0.6 m or less when nylon sand barriers are deployed in linear engineering protection in the medium and low wind energy areas. A Single-row nylon sand barrier with a height of 1 m can be configured at a wind speed of 8 $m \cdot s^{-1}$ and below. A wind speed of 8-12 $m \cdot s^{-1}$ can be configured with double-row nylon sand screens with an interval of 8H and a height of 0.8-1.0 m. In the high wind speed area (>12 $m \cdot s^{-1}$), the multi-strip compound configuration of nylon mesh sand barrier with widening distance to 10 H and a height of 1.2 m was selected. This model can optimize the design of sand control projects and improve the sand disaster prevention system of line engineering.

Keywords: high vertical sand barrier; windproof benefit; sand blocking rejection rate; configuration optimization